

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Завьялова Ксения Владимировна

аспирант

Суханов Дмитрий Яковлевич

канд. физ.-мат. наук, доцент

Томский государственный университет

г. Томск, Томская область

РАДИОГОЛОГАФИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО СТОРОННЕГО ИСТОЧНИКА СФЕРИЧЕСКИХ ВОЛН

***Аннотация:** предлагается метод восстановления радиоизображений рассеивающих объектов на основе измерения амплитуды поля интерференции прямой волны от стороннего монохроматического источника и волны, рассеянной исследуемым объектом. Показана возможность восстановления плоского изображения исследуемого объекта. Приводятся результаты численного моделирования и экспериментальных исследований на радиоволнах с частотой 10 ГГц. Достоверность предложенного метода подтверждается согласованием результатов численного моделирования и результатов натурных экспериментов.*

***Ключевые слова:** радиоголография, синтез апертуры, интерференция.*

Рдиотомография и радиовидение находят применение в дефектоскопии и системах контроля качества [1-2]. Одним из перспективных направлений развития систем радиотомографии является радиоголографические методы, основанные не измерении только амплитуды поля [3-4].

Предлагается рассмотреть следующую радиоголографическую схему измерений (Рис. 1): имеется сторонний источник, расположенный на некоторой высоте от плоскости сканирования, излучающий зондирующий монохроматический радиосигнал, как в сторону исследуемого объекта, так и в сторону области измерения. Приёмник перемещается в ограниченной области

измерений, с определенным шагом, и измеряет амплитуду волнового поля. Исследуемый объект повернут на определенный угол к излучателю, и рассеивает падающий на него сигнал в направлении сканирующей системы. Поле от объекта попадает на измерительную плоскость, где интерферирует с полем волны источника зондирующего сигнала, которое играет роль опорного сигнала.

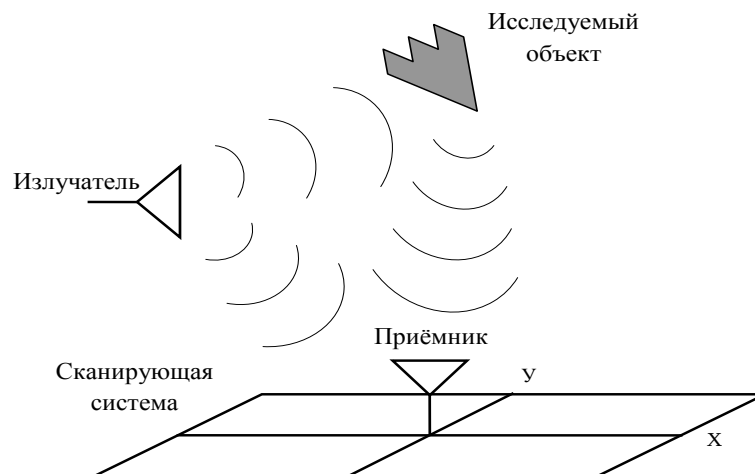


Рис. 1. Схема измерений

Для восстановления изображения объекта по измеренной амплитуде решаются прямая и обратная задачи распространения волн между полем источника и исследуемым объектом, и исследуемым объектом и плоскости измерения амплитуды.

Прямая задача состоит в определении комплексной амплитуды рассеянного волнового поля в плоскости измерений. Зададим изображение объекта в виде двумерной функции $M(x, y)$. Наклон объекта описывается линейно изменяющейся фазой коэффициента отражения объекта $\rho(x, y) = M(x, y) \exp(ik \cdot y \cdot \operatorname{tg}(\alpha))$, где α – угол наклона объекта относительно горизонтальной плоскости XU . Рассчитаем поле источника в плоскости объекта как функцию Грина свободного пространства [5]: $G_{SRC}(x, y) = \frac{\exp(ikr)}{4\pi r}$, где

$r = \sqrt{(x - x_{SRC})^2 + (y - y_{SRC})^2 + z_{SRC}^2}$, x_{SRC} – координата источника по оси x , y_{SRC} – координата источника по оси y , z_{SRC} – расстояние от источника до плоскости объекта по оси z . Поле, рассеянное объектом, в плоскости объекта запишем

как: $U(x, y) = G_{SRC}(x, y) \cdot \rho(x, y)$. Далее рассчитаем поле в плоскости приёма, рассеянное объектом, в виде интеграла свёртки:

$$V(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U(x', y') G_0(x - x', y - y', z_{SRC} + h) dx' dy', \quad (1)$$

$$\text{где } G_0(x, y, z) = \frac{\exp(ikr)}{4\pi r}, \quad r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}.$$

В найденное поле $V(x, y)$ добавим поле источника $\tilde{V}(x, y) = V(x, y) + G_1(x, y)$, где $G_1(x, y) = \frac{\exp(ikr)}{4\pi r}$, $r = \sqrt{x^2 + y^2 + h^2}$, h – расстояние от плоскости измерений до источника по оси z .

Вычисляем квадрат амплитуд поля (интенсивность) в плоскости измерений, что фактически является результатом эксперимента:

$$W(x, y) = \tilde{V}(x, y) \cdot \tilde{V}^*(x, y). \quad (2)$$

Далее решается обратная задача: по измеренному полю в плоскости сканирующей системы ($W(x, y)$) определяется комплексное волновое поле в плоскости исследуемого объекта. Для начала восстанавливаем поле в плоскости источника по измеренной интенсивности результирующего поля:

$$P(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W(x', y') G_{REF}^*(x', y') G_1(x - x', y - x') dx' dy', \quad (3)$$

$$\text{где } G_{REF}(x, y) = \frac{\exp(ikr)}{4\pi r} \quad - \quad \text{опорный сигнал от источника,}$$

$$r = \sqrt{(x - x_{SRC})^2 + (y - y_{SRC})^2 + h^2}.$$

Обнуляем область источника, чтобы выделить только поле от объекта: $P(x_{SRC}, y_{SRC}) = 0$. Фокусируем поле $P(x, y)$ в плоскость объекта, что является результатом восстановления изображения объекта:

$$\rho(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(x', y') G_0^*(x - x', y - y', z_{SRC}) dx' dy', \quad (4)$$

В соответствии с описанной выше схемой измерений (Рис. 1) был проведён численный эксперимент для восстановления изображения исследуемого плоского объекта по результатам измерения только амплитуды интерференционной картины поля.

Для численной модели в среде Mathcad сначала задавалась двумерная сетка пространственных координат на области 160 см на 160 см (вдвое больше области сканирования), затем сетка частот, а также координаты объекта, источника и области измерений соответственно. В качестве исследуемого объекта использовался плоский экран ступенчатой формы, с размером ступеньки 10 см на 10 см. Численное моделирование проводилось на одной частоте $f = 10$ ГГц. При этом исследуемый объект находился на высоте 97 см от сканирующей системы, и сдвинут относительно источника на расстояние 61,5 см. Передатчик находился в фиксированной точке пространства на высоте 59 см от плоскости сканирования.

На рис. 2 представлен результат численного моделирования амплитуды волнового поля, рассеянного объектом, в плоскости источника (результат решения прямой задачи - $W(x, y)$).

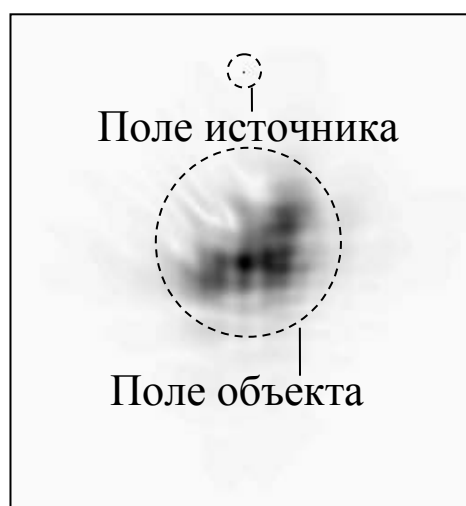


Рис. 2. Результат численного моделирования полного поля (комплексной амплитуды) в плоскости источника на области измерений 160 см на 160 см

Можно видеть, как изображение самого источника в виде чёрной точки, так и изображение поля исследуемого объекта. В последнем тёмные области соответствуют максимальным значениям амплитуды.

На рис. 3 приведены результаты численного эксперимента интенсивности результирующего поля в плоскости измерений амплитуды на частоте 10 ГГц.

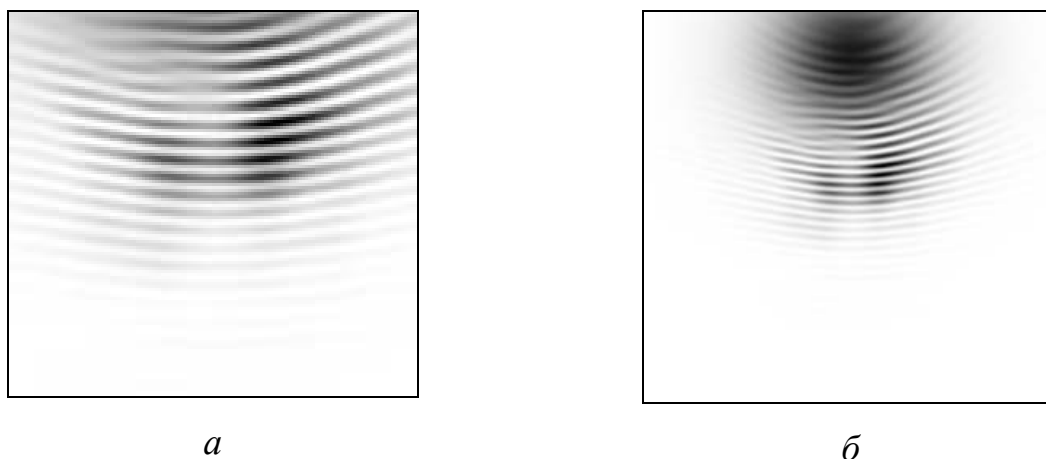


Рис. 3. Результат моделирования амплитуды интерференционной картины (*a* - в плоскости измерений 80 см на 80 см, *б* - в плоскости измерений 160 см на 160 см)

Полученная интерференционная картина даёт основания предполагать, что поле, рассеянное объектом, и опорное поле источника интерферируют друг с другом в плоскости измерения амплитуды, и, следовательно, полученное изображение содержит информацию об исследуемом объекте.

Результат численного моделирования восстановления произвольно заданного изображения плоского объекта ступенчатой формы для данной модели представлен на рис. 4 (результат решения обратной задачи - $\rho(x, y)$).

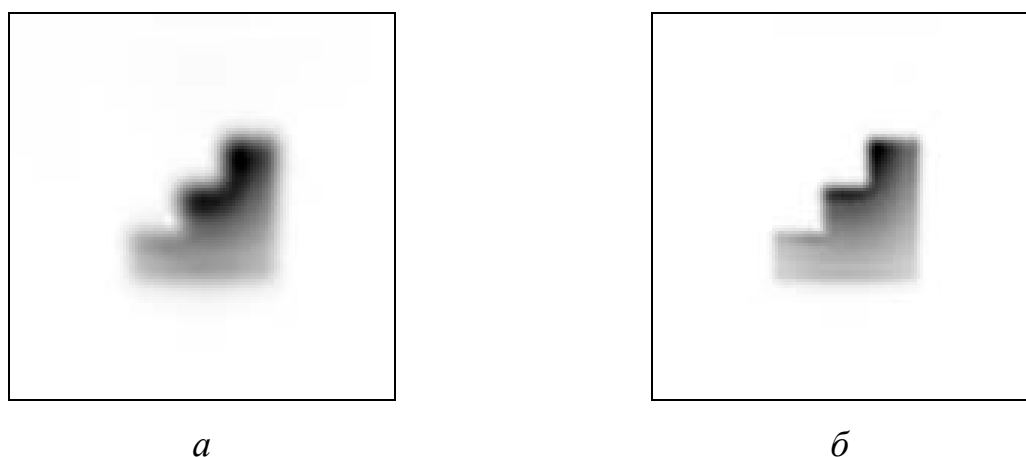


Рис. 4. Результат восстановления изображения исследуемого плоского объекта на частоте $f = 10$ ГГц – 3.6 *a* и на частоте $f = 20$ ГГц – 3.6 *б* на области измерений амплитуды 80 см на 80 см.

Результаты численных исследований показывают, что предложенный голографический метод позволяет восстановить изображение объекта даже на одной частоте без широкополосного сканирования по результатам измерения только амплитуды волнового поля (Рис. 4). Использование более высоких частот ($f = 20$ ГГц) позволяет улучшить разрешение восстанавливаемого изображения (Рис.4б).

Для проведения радиоголографических измерений была создана установка, изображённая на рис. 5. Экспериментальная установка включала в себя: передатчик и приёмник, генератор электромагнитных волн частотой 10 ГГц, сканирующую систему, управляемую компьютером, микровольтметр и контроллер шаговых двигателей. При этом передатчик и приёмник не связаны между собой. Радиоприёмник настроен на частоту 10 ГГц и измеряет только амплитуду волны с помощью нелинейного преобразования волны в детекторе. В детекторной секции установлен нелинейный элемент (диод), который возводит сигнал в квадрат (приблизённо), в результате чего получается постоянная составляющая и быстро изменяющийся сигнал (на удвоенной частоте, то есть 20 ГГц). Быстро меняющийся сигнал не проходит через фильтр низких частот, а проходит только постоянная составляющая, которая измеряется микровольтметром. Прорецированный сигнал попадает в микровольтметр, который оцифровывает значение напряжения и по интерфейсу RS232 передаёт данные в компьютер, где они сохраняются специальной программой.



Рис. 5. Фотография экспериментальной установки

Сканирующая система при этом представляет собой двухкоординатный сканер, движение которого осуществляется с помощью двух шаговых двигателей, что обеспечивает точность позиционирования, размещенного на нём, приёмника. Шаговые двигатели управляются контроллером, содержащим микросхему и транзисторы для усиления.

В качестве тестового объекта использовался плоский металлический экран ступенчатой формы, с размером ступеньки 10 см на 10 см. В экспериментальной установке передатчик был неподвижен и находился на высоте 59 см от плоскости сканирования. Исследуемый объект, повернутый относительно излучателя приблизительно на 45 градусов, находился на некоторой высоте, на расстоянии 97 см от сканирующей системы, и сдвинут относительно источника на расстояние 61,5 см. Расстояние от источника до плоскости объекта – 61 см. Измерения производились с шагом 1 см на области сканирования размером 80 x 80 см². Всего измерено 6400 точек. Длина волны используемого монохроматического радиосигнала порядка 3 см.

Результат экспериментальных измерений интенсивности результирующего поля в сканирующей плоскости на частоте 10 ГГц представлен на рис. 6.

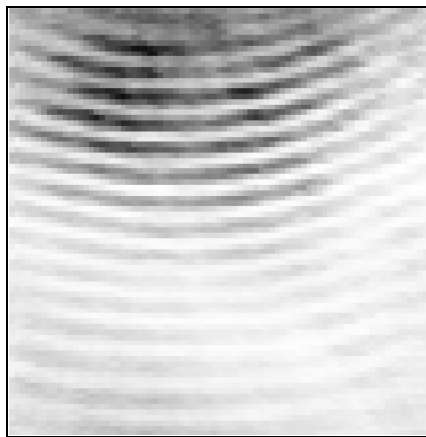


Рис. 6. Результирующая амплитуда интерференционной картины поля в плоскости измерений на частоте $f = 10$ ГГц (область сканирования: 80 см на 80 см)

Можно видеть, что наблюдается интерференционная картина. Это означает что сигнал, отражённый от объекта, интерферирует с сигналом от источника, который является опорным. То есть интерференционная картина содержит информацию об объекте. Полученный результат говорит о том, что предложенная схема измерений является дееспособной.

Полученные в результате экспериментальных исследований данные далее были обработаны в ходе численного моделирования, в процессе которого решалась обратная задача восстановления изображения исследуемого объекта (формулы 3-4). Результат обработки экспериментальных данных на частоте 10 ГГц представлен на рис. 7.

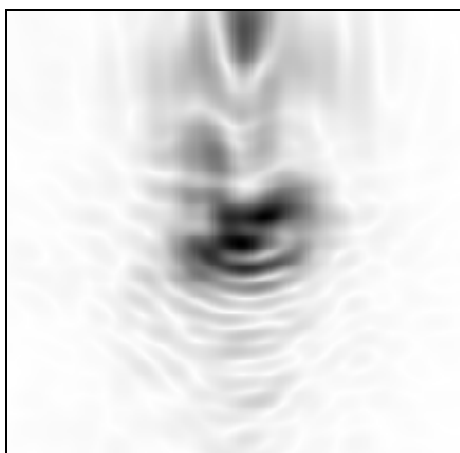


Рис. 7. Результат восстановления изображения исследуемого объекта на частоте $f = 10$ ГГц (область сканирования: 80 см на 80 см)

Заключение

Предложен метод радиоголографии с применением монохроматического стороннего источника сферических волн. Приведены результаты численного моделирования и экспериментальных исследований с вынесенным излучателем при радиозондировании узкополосным сигналом 10 ГГц с использованием двухкоординатного сканера. Качество изображений и разрешение могут быть улучшены при повышении частоты зондирования.

Список литературы

1. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли: Учебное пособие для вузов/ Под ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: «Радиотехника», 2005. – 368 с.
2. Yakubov V.P., Sukhanov D.Ya., Sklarczyk K.G., Pinchuk R.V., Bulavinov A.N., Bevetskii A.D. Radio-wave tomography of hidden objects for safety systems // Russian Physics Journal, 2008, vol. 51. No 10. pp. 1064-1082.
3. Суханов Д.Я., Завьялова К.В. Восстановление трехмерных радиоизображений по результатам многочастотных голографических измерений // Журнал технической физики, - 2012. - Т. 82. - Вып. 6. - С. 85-89.
4. Суханов Д.Я., Завьялова К.В. Система трёхмерного голографического сверхширокополосного радиовидения // Известия высших учебных заведений. Физика, - 2012. - Т. 55. - № 9/2. – С. 17-21.
5. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. -М.: Наука, - 1990.